

Forensische Lackuntersuchung und Spurenanalyse*

1. Einleitung

Im Auftrag von Versicherungen, Kfz-technischen Sachverständigen bzw Gerichten bearbeitet der Autor seit vielen Jahren Fragestellungen zur Lackierung bzw zu Schäden an Lackierungen von Kraftfahrzeugen. Diese betreffen unter anderem folgende Themenkomplexe:

- Beurteilung von Serien- oder Reparaturlackierungen hinsichtlich Optik sowie deren funktionellen Eigenschaften;
- Schäden von Lackierungen: durch Kontakt mit einem anderen Fahrzeug (Parkschaden ja/nein?) oder einem anderen Bauteil (Identitätsanalysen), Folierung bzw Entfolierung, Beschichtungsarbeiten (zB bei Fassaden oder im Korrosionsschutz), sogenannten Flugrost, Transport, Korrosion, Hagelschlag, Waschanlagen, Sabotage, Wild, Glasbruch.

Der Themenkomplex im ersten Aufzählungspunkt lässt sich in der Regel vergleichsweise einfach und mit geringem apparativem Aufwand abarbeiten. Bei Fragestellungen zum Themenkomplex im zweiten Aufzählungspunkt werden hingegen – in Abhängigkeit von den konkret gestellten Fragen – der kombinierte Einsatz moderner Analysemethoden und/oder umfangreiche Nachstellversuche, zB mit Klimakammern (mit/ohne Sonnensimulation), in Korrosionsprüfgeräten usw, erforderlich. Anhand der Gutachtertätigkeit sollen in diesem Beitrag einige Einsatzmöglichkeiten zur forensischen Lackspurenuntersuchung durch kombinierte Anwendung moderner Analysemethoden näher vorgestellt und deren Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit, aber auch deren Grenzen aufgezeigt werden. Vorangestellt werden einige grundlegenden Eigenschaften von Kfz-Lackierungen, die in den Themenkomplex im ersten Aufzählungspunkt fallen.

2. Beurteilung von Serien- oder Reparaturlackierungen hinsichtlich Optik sowie deren funktionellen Eigenschaften

Folgende grundlegenden Eigenschaften von Lackierungen, die prüftechnisch zerstörungsfrei erfasst und mit einem Messwert belegt werden können, sind zB:

- Farbe, Farbunterschied (zB bei Serienlackierungen zwischen Karosserie und Anbauteilen bzw bei Reparaturlackierungen), Metamerie;
- Glanz bzw Glanzunterschiede;
- Gesamtschichtdicke (zB zur Klärung, ob reparaturlackierte Bereiche vorliegen).

Parameter, wie zB:

- Haftfestigkeit,
- mechanische Eigenschaften (wie zB Oberflächenhärte, Abriebverhalten, Kratzfestigkeit, Verhalten bei Steinerschlagbelastung bzw Hagelschlag oder gegenüber Waschbürsten),
- chemische Beständigkeit (wie zB gegen Reinigungsmittel, Baumharze, Vogelkot, Insektensäfte, Insektenentfernungsmittel),
- Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse (wie zB gegen Salzsprühnebel, Feuchtigkeit, künstliche Bewitterung, Temperaturwechselbelastung),

sind hingegen in der Regel nur zerstörend zu prüfen.

Die Prüfungen zur Bestimmung der oben angeführten Parameter sind normativ belegbar oder in Richtlinien festgehalten. Erschwerend bei der Beurteilung ist allerdings die Tatsache, dass es nur für wenige Parameter definierte Norm-Anforderungswerte bzw Anforderungswerte der Kfz-Hersteller gibt bzw diese firmeninternen Werte nicht gerne preisgegeben werden. Insofern werden derartige Prüfungen in der Praxis entweder vergleichend durchgeführt (Gut-Schlecht-Muster) oder es müssen Erfahrungswerte zur Bewertung herangezogen werden.

Beispiel 1: Bei der Reparaturlackierung von zirka einem Jahr alten Bussen sind Farbunterschiede zur Originallackierung aufgefallen. Zur Reparaturlackierung wurden Beschichtungsstoffe eines anderen Herstellers verwendet. Auftragsgemäß war durch eine Befundaufnahme an Ort und Stelle unter anderem mit farbmtrischen Untersuchungen zu klären, inwiefern die gegenständliche Beschichtung des untersuchten Busses dem ausbedingenen Farbton RAL 9016 („Verkehrsweiß“) entspricht bzw für den Fall, dass der Farbton nicht RAL 9016 entspricht, zu

* Zusammenfassung eines Vortrags, gehalten am 24. 1. 2017 anlässlich des 40. Internationalen Fachseminars Straßenverkehrsunfall und Fahrzeugschaden für Sachverständige und Juristen im Kongresszentrum in Bad Hofgastein.

klären, welcher andere RAL-Farbtone am ehesten zutrifft (siehe Abbildung 1).

Dazu wurden standardmäßig die Gesamtschichtdicke der Lackierung geprüft und der Glanz (als Reflektometerwert) bestimmt; dies war erforderlich, um die Farbkarte aus dem korrekten Farbbereich (RAL 840 HR [für matte Oberflächen] oder RAL 841 GL [für glänzende Oberflächen]) auszuwählen.

Alle Befundaufnahmestellen zeichnen sich – im Vergleich zu der Referenzkarte RAL 9016 GL (Ausgabedatum: 28. 11. 2016) – insbesondere durch einen positiven Δb -Wert aus und sind demnach die Befundaufnahmestellen 1 und 2 gelblicher als die Referenzkarte; Insofern bestätigen die farbmetrischen Messungen die Ergebnisse der visuellen Beurteilung. Zu der nächsten in Frage kommenden Farbkarte (RAL 9010) wurde der Farbabweichungswert mit circa 2,5 bestimmt. Demnach war die Frage „Entspricht die gegenständliche Beschichtung des untersuchten Busses dem ausbedungenen Farbton RAL 9016 („Verkehrsweiß“)?“ wie folgt zu beantworten:

„Alle Befundaufnahmestellen stimmen hinsichtlich der farbmetrischen Kennwerte am besten/ehesten mit dem ausbedungenen Farbton RAL 9016 (aus dem Glanzregister 841 GL) überein. Zur Begründung wird angeführt, dass zur Farbkarte RAL 9016 GL ein Farbabweichungswert (ΔE) von circa 1 bis 1,3 ermittelt wurde, zur nächst möglichen Farbkarte (RAL 9010 GL) hingegen bereits ein Farbabweichungswert von circa 2,5.“

3. Themenkomplex Aufklärung von Schäden bei Kfz-Lackierungen

Bei der Aufklärung von Schadensfällen an Kfz-Lackierungen kann der Sachverständige in der Zwischenzeit auf ein reichhaltiges Instrumentarium zurückgreifen. Dabei kommen im Bedarfsfall neben Klimakammern (bei Temperaturen von -70°C bis $+150^\circ\text{C}$ mit/ohne Feuchtigkeit bzw mit ohne Sonnensimulation zu betreiben), diversen Korrosionsprüfgeräten (zB klassische Salzsprühkammern) vor

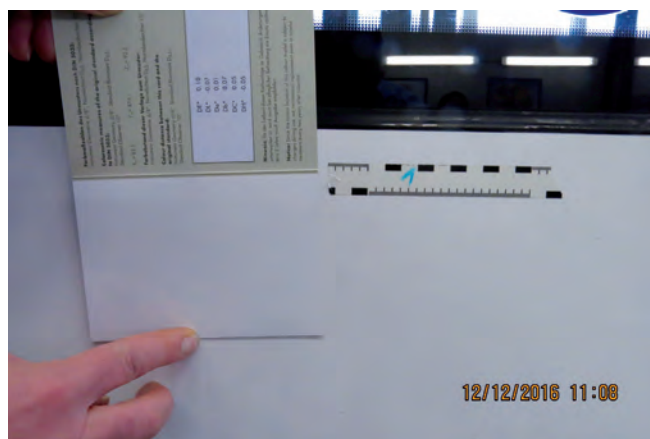


Abbildung 1: Farbkarte RAL 9016 aus dem Farbbereich 841 GL und Buslackierung

allen chemisch-physikalischen Analyseverfahren zur Anwendung. Die früher gerne zur Analyse von Abriebsspuren durchgeführten Löslichkeitsuntersuchungen wurden in der Zwischenzeit *de facto* von einer Kombination aus den in Abbildung 4 angeführten mikroskopischen Verfahren abgelöst. Die prinzipiellen Anforderungen an die Analyseverfahren sind:

- Eignung für Spurenanalytik;
- möglichst zerstörungsfrei bzw mit äußerst geringem Substanzbedarf arbeitend;
- hohe Unterscheidungsfähigkeit;
- analytische Information muss eindeutig und reproduzierbar sein.

Die angeführten Analysemethoden zielen auf unterschiedliche Bestandteile der einzelnen Lackschichten, weshalb im nächsten Schritt zunächst ein kurzer Exkurs zum Schichtaufbau von Kfz-Lackierungen sowie zu den grundlegenden Bestandteilen eines Beschichtungsmittels, der in flüssiger, pulverförmiger oder in suspendierter Form appliziert wird und nach dem Trocknungs- bzw Härtingsprozess einen Beschichtungsfilm ergibt, folgt (siehe Abbildung 3).

Ergebnisse der farbmetrischen Untersuchungen; Vergleich: Referenzkarten aus dem Farbbereich 841 GL, Oberflächen mit einem Baumwolllappen trocken abgewischt								
Untersuchter Bereich/RAL-Farbkarte	Referenz	Farbkennwerte						
		L	a	b	ΔL	Δa	Δb	ΔE
RAL 9016 GL	–	94,72	-1,14	1,37	–	–	–	–
RAL 9016 GL	RAL 9016				0,01	-0,02	0,04	0,05
Befundaufnahmestelle 1; Messung 1	RAL 9016				-0,40	0,15	1,41	1,47
Befundaufnahmestelle 1, Messung 2	RAL 9016				-0,42	0,14	1,36	1,43
Befundaufnahmestelle 1, Messung 1	RAL 9010				-0,43	-0,48	-2,39	2,48

Abbildung 2: Ergebnisse der farbmetrischen Untersuchungen

L, a, b: Farbkennwerte ΔL : Abstand in der Hell-Dunkel-Achse
 Δa : Abstand in der Rot-Grün-Achse Δb : Abstand in der Gelb-Blau-Achse
 ΔE : Farbabweichungswert

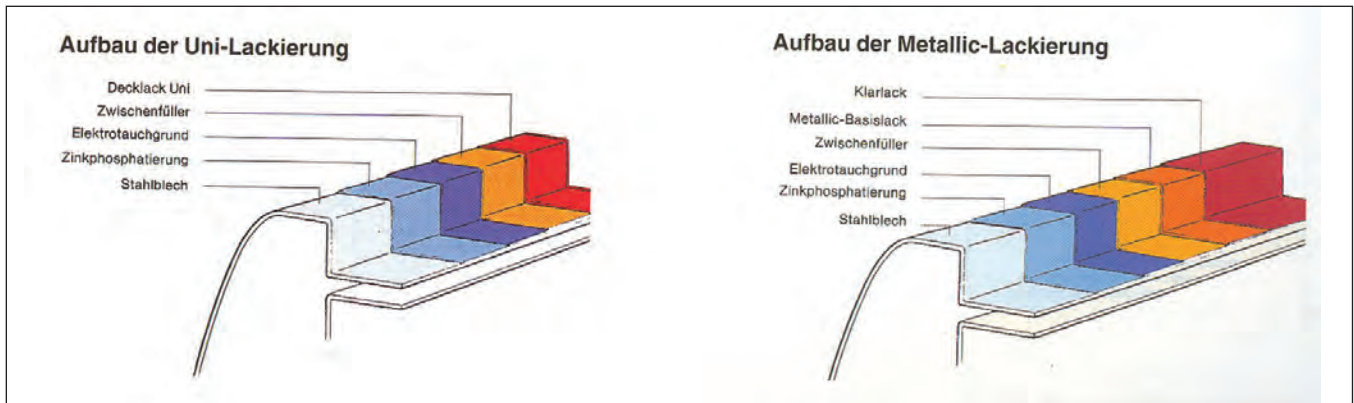


Abbildung 3: Vergleich zum Schichtaufbau einer Uni-Lackierung bzw. einer Metallic-Lackierung mit daraus resultierenden Gesamtschichtdicken von zirka (90 bis 120) µm (Quelle: Sydow, Schäden am Autolack [1995])

Die grundlegenden Bestandteile eines Beschichtungsstoffs (Lackes) können unterteilt werden in:

- flüchtige Bestandteile: Wasser, organische Lösemittel;
- nicht flüchtige Bestandteile: Bindemittel (zB PUR); Pigmente (zB Aluminiumflitter im Basecoat); Klarlacke sind pigmentfrei; Füllstoffe; Hilfsstoffe (< 1 %).

Der Weg von der Probenahme bis zum verwertbaren Ergebnis: Probenahme -> Probenvorbereitung -> Analyse -> Interpretation der Analyseergebnisse stellt hohe Anforderungen an die Analysengeräte und ist nur mit entsprechend qualifiziertem und speziell geschultem Personal machbar. Gerade der Punkt „Probenahme“ ist im gegenständlichen Fall ein schwieriges Thema. Idealerweise sollte die Probenahme möglichst unmittelbar nach dem Schadensfall er-

folgen. Die Realität sieht in der Mehrzahl der Fälle anders aus. Bei der Entnahme von Probe (zB Farbabrieb mittels Skalpells und Lupe) ist zudem zu beachten, dass auch ein intakter Bereich der Beschichtung (für Vergleichsuntersuchungen) zu entnehmen ist; dies ist deshalb erforderlich, da bei der Musterentnahme nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch Material von der originären Lackierung mitentnommen wird. Erschwerend ist die nach wie vor gelebte Praxis, Abriebspuren durch Abklatschproben auf, im Extremfall zwischen zwei Klebebändern zu sichern. Dies ist deshalb erschwerend, weil kleine Abriebspuren in der Regel nicht völlig frei vom Klebstoff des Klebebandes isoliert werden können bzw. der Klebstoff des Klebebandes ebenfalls eine – allerdings nicht probenspezifische – Information liefert.

Gegenüberstellung der Analysemethoden	
Methode	Liefert Informationen zu
Lichtmikroskopie	Schichtaufbau Einzelschichtdicken Lokalisierung von Fehlstellen Beurteilung der Homogenität von Abriebspuren
Infrarotspektroskopie (FTIR)	Organische Bestandteile (Bindemittelbasis)
Rasterelektronenmikroskopie/EDX	Anorganische Bestandteile (Pigmente, Füllstoffe) in den Lackschichten bzw. in artfremden Abriebspuren
Thermoanalytik	Pigment- und Füllstoffanteil sowie zum Bindemittelanteil
CHNSO	Mischungsverhältnis bei 2K-Beschichtungsstoffen
Gaschromatografie	Flüchtige organische Verbindungen (zB in Blasen)
Röntgenfluoreszenz	anorganische Anteile (Elementinformation) mit geringerer Nachweisgrenze als EDX
Röntgendiffraktion	Anorganische Anteile (Quantifizierung und Information über die chemische Zusammensetzung)

Abbildung 4: Gegenüberstellung der Analysemethoden

Bei der Anwendung der Spurenanalytik ist generell folgenden Arbeitsschritten besonderes Augenmerk zu schenken:

- **Probenahme:** ZB: Verschmutzte Fahrzeuge sind vorsichtig mit Leitungswasser in Trinkwasserqualität zu reinigen, ohne die zu entnehmenden Abriebspuren abzuwischen. Beim Fahrzeughalter ist zu hinterfragen, ob das Kraftfahrzeug seit dem klagsgegenständlichen Ereignis zB mit einer Wachspflege bzw einer Politur oder sonstigen Schichtbildnern gepflegt worden ist. Für die Entnahme sind – sofern möglich – mehrere Stellen vorzusehen. Es sind eine saubere Spatel und nur neue (noch nicht verwendete) und geeignete Probenahme-säckchen zu verwenden, um eine Kontamination mit nicht probenspezifischem Material zu vermeiden. Sollte bei der Musterentnahme Farbabrieb auf den Boden fallen, ist dieser zu verwerfen. Die Proben sind so zu manipulieren, dass eine Kontamination ausgeschlossen werden kann.
- Bei den chemisch-analytischen Spurenanalysen empfiehlt es sich, – sofern möglich – die Analysen zur Absicherung an mehreren Stellen einer Probe zu wiederholen sowie – falls der Untergrund ins Ergebnis einfließen kann (zB bei einem Lackabrieb auf einer Beschichtung bzw einem Kunststoffteil) – auch den Untergrund mitzuanalysieren. Die Entnahme der Proben für die rasterelektronenmikroskopischen und infrarotspektroskopischen Analysen erfolgt idealerweise unter dem Lichtmikroskop, mit dem auch die Homogenität der zu untersuchenden Probe beurteilt werden kann.
- Nur bei entsprechend großen Unterschieden im Signal-Rauschverhältnis bzw im Spektrenvergleich sind eindeutige Aussagen zur Identität bzw Nicht-Identität möglich.

4. Schadensaufklärung

4.1. Allgemeines

Bei Schadensaufklärung im Mikrobereich stellen neben der „Größe“ (oft < 100 µm) meist auch die geringen Probenmengen hohe Anforderungen an Personal und Analysengeräte. Erschwerend kommt hinzu, dass die relevanten Untersuchungsbereiche häufig von einer mehr

oder weniger störenden Matrix umgeben sind. Um zu korrekten Aussagen zu kommen, ist daher insbesondere der Probenvorbereitung, aber auch der Interpretation der Analyseergebnisse besondere Beachtung zu schenken. Dennoch zeigt die experimentelle Praxis, dass die in den nachfolgenden Beispielen angeführten Untersuchungsmethoden trotz aller dieser Schwierigkeiten – einzeln, aber vor allem in Kombination angewandt – ein schlagkräftiges Instrumentarium zur eindeutigen und raschen Aufklärung von Schadensfällen sind.

Daraus leitet sich ab, dass für Spurenanalysen die Größe der Fehlstelle zumindest 100 µm (das heißt 0,1 mm) groß sein sollte. Diese Größe (Fehlstelle mit dem unbewaffneten Auge für Normalsichtige erkennbar) stellt die unterste Grenze für Manipulationen unter dem Mikroskop dar (etwa um zu erkennen, wo bei Lacksplittern „oben“ oder „unten“ ist bzw. für die Herstellung von Querschliffen).

4.2. Lichtmikroskopie

Das erste Lichtmikroskop wurde wahrscheinlich schon vor etwa 380 Jahren in Holland gebaut, der Durchbruch seiner Anwendung im Bereich der Materialanalytik gelang allerdings erst wesentlich später, nämlich nach entsprechenden technischen Verbesserungen, welche insbesondere von *Ernst Karl Abbe* und von *Carl Zeiss* im 19. Jahrhundert vorgenommen wurden. Heute werden in der Materialprüfung gängige Lichtmikroskope in unterschiedlichsten Betriebsweisen eingesetzt. Auflicht- bzw Durchlicht-Techniken, mit bzw ohne polarisiertem Licht, unter Ausnutzung des Hell- bzw Dunkelfeldes usw, sind nur einige Schlagworte, die routinemäßig eingesetzte Betriebsparameter kennzeichnen.

Durch Anwendung spezieller Präparationsmethoden (zB Arbeiten mit Ölimmersion) bzw durch Verwendung von kurzwelligem Licht kann die Auflösung weiter verbessert werden, sodass auch Strukturen unterhalb von 5 µm durchaus noch routinemäßig erfaßbar sind. Okulare mit integrierter Skalierung gestatten das Vermessen von Strukturen (zB Schichtdicken) bis in den µm-Bereich. Der in der Praxis anwendbare Vergrößerungsbereich ist auf etwa 1.000-fach limitiert, bei den hohen Vergrößerungen ist dabei allerdings bereits mit erheblichen Tiefenschärfe-Problemen zu

Die mikroskopischen Methoden Lichtmikroskopie (LM), Infrarotspektroskopie (FTIR) und Rasterelektronenmikroskopie (REM) im Vergleich					
Methode	Minimale Probengröße für Präparation	Optische Auflösung	Nachweisgrenze	Zeitbedarf	zerstörungsfrei
LM	ca. 100 µm	ca. 1 µm	–	gering	ja/nein
FTIR	min. 10 – 20 µm	ca. 5 µm	10 ⁻⁹ g	gering	nein
REM	< 10 µm	< 10 nm	0,5 % bzw 10 ⁻¹⁵ g	sehr gering	nein

Abbildung 5: Die mikroskopischen Methoden Lichtmikroskopie, Infrarotspektroskopie und Rasterelektronenmikroskopie im Vergleich

rechnen. Von Ausnahmefällen abgesehen (zB bei niedrigen Vergrößerungen und bei Verwendung entsprechender Stativen) erfolgen mikroskopische Untersuchungen in der Regel nicht direkt vor Ort, sondern im Labor. Der große Vorteil der Lichtmikroskopie liegt dabei in der Vielzahl unterschiedlicher Präparationstechniken (zB Herstellung von Querschliffen und Dünnschnitten, Einfärbe- und Ätztechniken), die auf praktisch alle festen Proben anwendbar sind: So können beispielsweise Querschliffe durch interessierende Strukturen (wie Stippen, Krater, Blasen, Einschlüsse etc) bei vorsichtiger Probenpräparation schon ab einer Größe von zirka 100 µm erfolgreich durchgeführt werden. Soll umgekehrt die Topografie einer Oberfläche wiedergegeben bzw charakterisiert werden, so kann dies häufig mithilfe spezieller Beleuchtungstechniken (zB Streiflicht mithilfe sogenannter Schwanenhälse) realisiert werden, wobei sich gerade für die zuletzt genannte Problemstellung die Verwendung eines Zoom-Stereomikroskops (mit bis zu etwa 100-facher Vergrößerung) als optimal erwiesen hat. Meist erfolgt im Rahmen der Materialprüfungen eine fotografische Dokumentation der Bildinformation („Ein Bild sagt mehr als 1.000 Worte“), wobei allerdings die Farbwiedergabe am Foto nur in den seltensten Fällen den tatsächlichen Objektfarben entspricht. Über Kopplung mit Videokameras ist einerseits auch eine Bildschirmdarstellung möglich, andererseits wird dadurch auch die Bearbeitung des (digitalisierten) Bildes über nachgeschaltete Bildauswertesysteme möglich.

Als Nachteil der Lichtmikroskopie ist – wie auch bei den übrigen beschriebenen mikroskopischen Methoden – festzustellen, dass die Untersuchungen in der Praxis nur selten zerstörungsfrei vorgenommen werden können, wodurch sich zum Teil ein erheblicher Zeitaufwand für die Probenvorbereitung ergibt. Davon abgesehen beinhalten diese Probenvorbereitungsmaßnahmen häufig auch die Gefahr einer Artefaktbildung mit den daraus ableitbaren Fehlinterpretationen von Untersuchungsergebnissen.

4.3. Infrarotspektroskopie

Die Infrarot-Spektroskopie (auch IR- bzw Ultrarot-Spektroskopie) wurde zwar schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts erstmals auf wissenschaftlicher Ebene praktiziert, ihr routinemäßiger Einsatz in der Materialprüfung erfolgte allerdings erst etwa 40 bis 50 Jahre später. Das Prinzip beruht auf der Aufnahme von Infrarot-Absorptionsspektren der zu analysierenden Stoffe, welche in weiterer Folge zur qualitativen und quantitativen Analyse und Konstitutionsermittlung herangezogen werden. Die Spektren kommen dadurch zustande, dass die an Bindungen beteiligten Atome eines Moleküls Schwingungen ausführen, wenn ihnen die dafür benötigte Anregungsenergie in Form der Infrarot-Strahlung zugeführt wird. Bedingung für eine solche Anregung ist, dass mit der Schwingung eine periodische Änderung des Dipolmoments des Moleküls einhergeht, was jedoch in der Praxis bei allen organischen und auch bei den meisten anorganischen Stoffen der Fall ist.

Die für analytische Problemlösungen routinemäßig eingesetzten handelsüblichen IR-Spektrometer arbeiten durchwegs im mittleren IR-Wellenlängenbereich zwischen etwa 2,5 µm und 25 µm, entsprechend Wellenzahlen zwischen 4000 cm⁻¹ und 400 cm⁻¹.

Bis in die späten 1960er-Jahre wurden Prismen- oder Gittergeräte verwendet, welche die von einem geeigneten Strahler (zB Nernst-Stift, Nickel-Chrom-Wendel, Global) emittierte IR-Strahlung zunächst in die einzelnen Wellenlängen zerlegten und diese anschließend der Probe zuführten. Als Detektoren zur Messung der Strahlungsabsorption wurden Thermoelemente und Golay-Detektoren, später auch Halbleiter-Detektoren eingesetzt.

Bei den heute handelsüblichen Geräten handelt es sich dagegen durchwegs um sogenannte FTIR-Spektrometer, bei denen anstelle des Prismas bzw Gitters ein Interferometer (meist vom Michelson-Typ) die zentrale Einheit darstellt. Die IR-Strahlung wird hier direkt (bzw nach Passieren der Probe) über dieses Interferometer geleitet. Es resultiert ein Interferogramm, aus welchem durch komplexe mathematische Nachbearbeitung (der sogenannte Fourier-Transformation) das eigentliche IR-Spektrum errechnet wird. Die zuletzt erwähnten Berechnungsalgorithmen setzen entsprechende Computertechnik voraus, was als eigentlicher Grund dafür angesehen werden kann, dass FTIR-Geräte erst innerhalb der letzten 20 Jahre ihren Durchbruch in der Materialuntersuchung schafften.

Kombiniert man diese grundlegende FTIR-Analysentechnik mit der von der Lichtmikroskopie her bekannten Strahlungsführung, so gelangt man zur FTIR-Mikroskopie. Weil allerdings Glasprismen die IR-Strahlung absorbieren würden, muss bei FTIR-Mikroskopen die Strahlungsfokussierung über relativ komplexe Spiegelsysteme (sogenannte Cassegrain-Objektive) erfolgen. Als Detektoren gelangen meist höchstempfindliche Halbleiter-Detektoren auf Basis Quecksilber-Cadmium-Tellurid (MCT-Detektoren) zum Einsatz, welche mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden müssen.

Fast alle handelsüblichen FTIR-Mikroskope gestatten heute die Untersuchung von Proben sowohl im Transmissions- wie auch im Reflexionsmodus; die minimale Probengröße ist dabei im Wesentlichen durch die Wellenlänge der eingesetzten IR-Strahlung bestimmt und sollte nicht unter 10 µm bis 20 µm liegen. Für die Probenpräparation gelten ähnliche Voraussetzungen wie bei der Standard-IR-Spektroskopie, zum Teil wurden jedoch auch zusätzliche Mikromethoden entwickelt. Als Beispiel sei hier die sogenannte Hochdruck-Mikrodiamantzelle erwähnt, bei der die Probe zwischen zwei planparallel geschliffenen, IR-durchlässigen Diamantprismen flachgepresst und in Transmission untersucht wird.

Mit FTIR-Mikroskopen der jüngsten Generation können auch nicht durchstrahlbare und nicht reflektierende Proben (zB stark füllstoffhaltige Partikel) mittels Oberflächentechniken (Mikro-ATR-Technik) untersucht werden. Dabei ist zu beachten, dass es hierbei auch zu einem geringfügigen Eindringen der IR-Strahlung in die Probe kommt, wobei

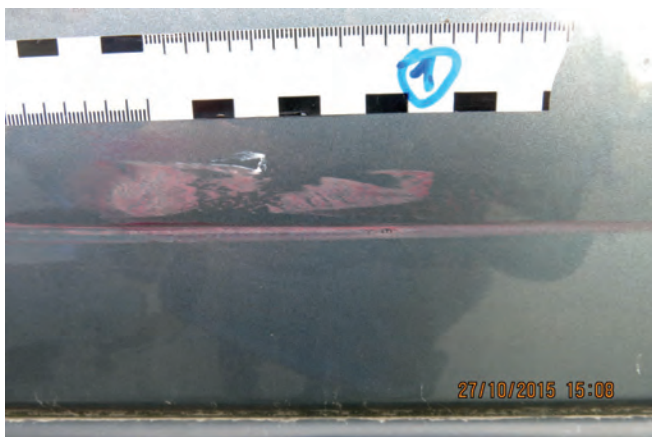


Abbildung 6: Rote Abriebspur am Klagsfahrzeug



Abbildung 7: In Verdacht stehender Blinkercellon



Abbildung 8: Vom Klagsfahrzeug isolierter roter Abrieb (mit Resten der originären Lackierung)

die Eindringtiefe meist im μm -Bereich liegt und von der Wellenlänge der auftreffenden IR-Strahlung abhängt.

Einen ganz wesentlichen Faktor im Hinblick auf Bedienungskomfort, Automatisierung und Qualitätsmanagement-Anforderungen stellt bei den Geräten der neuesten Generation die Softwaresteuerung des gesamten Analy-

senablaufs bei gleichzeitiger Optimierung der visuellen Probendarstellung (über eine angeschlossene Videokamera mit entsprechender Bildverarbeitung) dar. Bei einer maximalen Vergrößerung von etwa 500-fach ist die Optik des Mikroskops dabei so ausgerichtet, dass eine optimale Fokussierung für die (visuelle) Bilddarstellung gleichzeitig auch der korrekten Geräteeinstellung für die IR-Spektrenaufnahme entspricht. So gestatten moderne Softwareprogramme in Kombination mit einem mikroprozessorgesteuerten Probenstisch zB ein automatisches Abtastern von Probenoberflächen innerhalb definierter Bereiche (*mapping*; Erstellung „chemischer“ Oberflächenprofile) oder aber auch entlang festgelegter Linien (*line scan*) bzw Punkte (*scan all markers*); diese automatisierte Spektrenaufnahme kann sowohl im Durchlicht- und Auflicht- als auch im Reflexionsmodus angewendet werden.

4.4. Rasterelektronenmikroskopie bzw EDX-Analyse

Ähnlich wie bei der FTIR-Mikroskopie hat auch die Rasterelektronenmikroskopie (REM) vor allem wegen der Kombination von Bildinformation auf der einen Seite und analytischer Aussagekraft (Elementbild) auf der anderen große Bedeutung im Bereich der Schadensanalytik erreicht. Während bei der FTIR-Mikroskopie der Schwerpunkt analytischer Aussagen sicherlich im Bereich organischer Verbindungen zu suchen ist, liegt dieser bei der REM eindeutig im anorganischen Bereich, sodass sich diese beiden Untersuchungsmethoden in vielen Fällen optimal ergänzen.

Bei der Rasterelektronenmikroskopie, deren Anfänge auf die 30er-Jahre des 20. Jahrhunderts zurückgehen, wird im Hochvakuum ein Elektronenstrahl (generiert aus einer Wolframkathode im Wehneltzylinder) durch elektromagnetische Linsen auf die Probenoberfläche fokussiert und über Ablenkspulen eines Rastergenerators in einem Rechtecksmuster über die Probe geführt (sogenanntes Abrastern). Durch Wechselwirkung dieser primären Elektronen mit der Probe entstehen sogenannte sekundäre Elektronen, rückgestreute Elektronen sowie Röntgenstrahlung. Während die sekundären und rückgestreuten Elektronen zur eigentlichen Abbildung der Probe benutzt werden, können über die freigesetzte Röntgenstrahlung Hinweise zur elementaren Zusammensetzung derselben erhalten werden.

Die Energie der Sekundärelektronen ist relativ gering, weshalb bei REM-Aufnahmen in erster Linie die oberste Schicht der Probe (Topografie) abgebildet wird; rückgestreute Elektronen liefern dabei zusätzliche Informationen über die Ordnungszahl der vorhandenen Elemente, weil Elemente mit hoher Ordnungszahl „heller“ abgebildet werden als solche mit niedrigerer Ordnungszahl.

Die Detektion der Röntgenstrahlen im Rahmen qualitativer und semiquantitativer Analysen ist bei einer typischen Analysenzeit von etwa 50 Sekunden bei den neuesten Gerätegenerationen bereits ab dem Element Bor bis hin zum Uran möglich. Je nach benötigtem Auflösungsvermögen werden unterschiedliche Detektortypen (EDX, WDX) eingesetzt. Bei der Analyse dringt der Primärelektronenstrahl in die

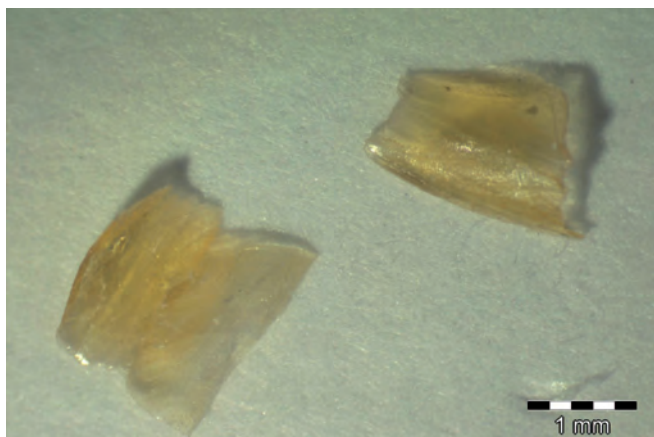


Abbildung 9: Von Blinkercellon isoliertes Material



Abbildung 11: Haare auf einer vorderen Kunststoffstoßstangenverkleidung mit „aufglänzenden Stellen“

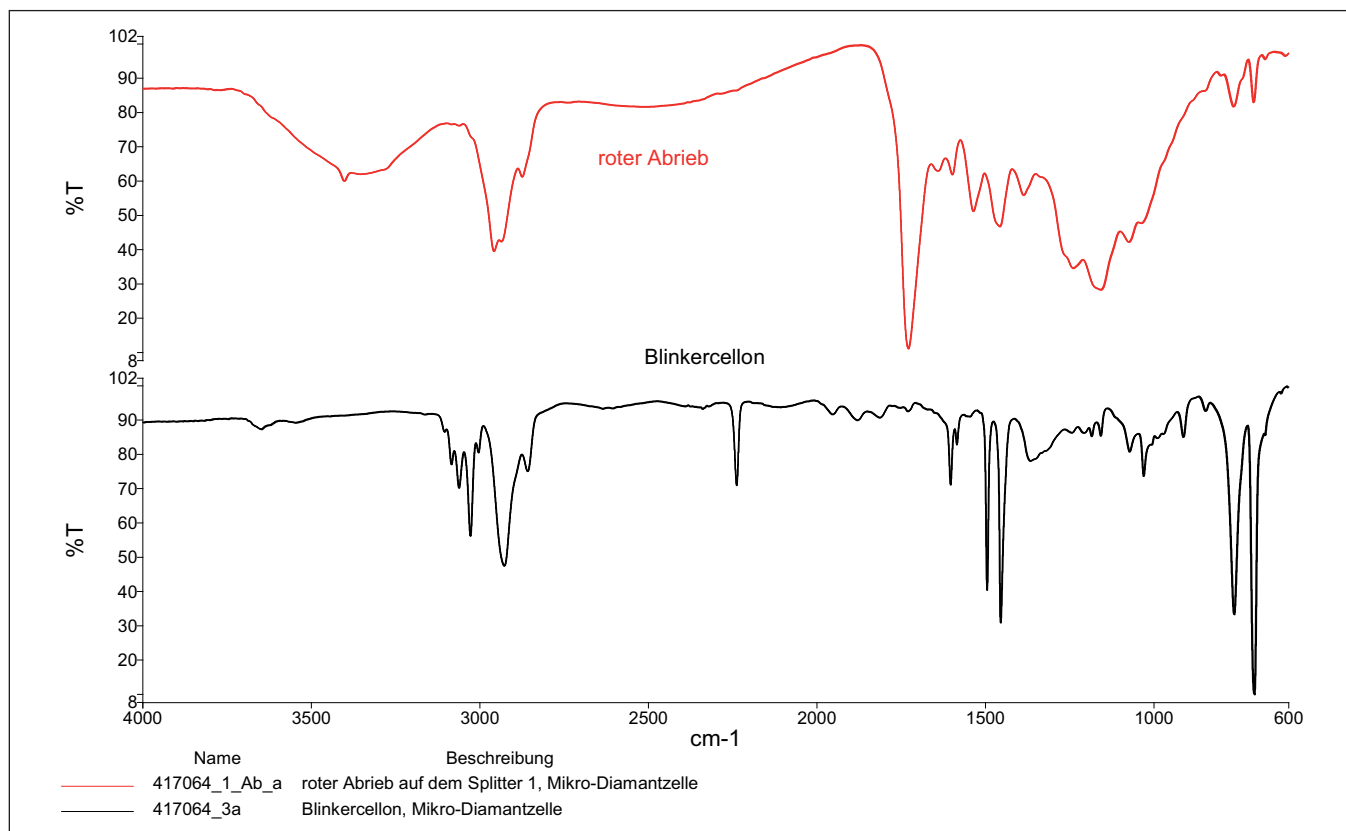


Abbildung 10: Gegenüberstellung der Infrarotspektren vom Blinkercellon und dem roten Abrieb am Klagsfahrzeug

Oberfläche ein, sodass auch Beiträge von tiefer liegenden Schichten zum Meßergebnis resultieren. Die Eindringtiefe des Elektronenstrahls ist primär abhängig von der angelegten Beschleunigungsspannung sowie der Dichte des untersuchten Materials. Bei einer Spannung von 30 kV und einer für Kunststoffe und Lacke üblichen Dichte im Bereich 1 g/cm^3 beträgt die Eindringtiefe zirka $13 \mu\text{m}$, bei einer Spannung von 10 kV dagegen nur mehr zirka $3 \mu\text{m}$. Allerdings ist eine beliebige Reduktion der Beschleunigungsspannung – um ausschließlich die Oberfläche zu analysieren – nicht möglich, da ansonsten die Elemente für die EDX-Analyse nicht mehr ausreichend angeregt werden.

Im Vergleich zur Licht- und auch zur FTIR-Mikroskopie zeichnet sich die Rasterelektronenmikroskopie durch eine deutlich bessere Auflösung sowie durch einen erheblich höheren Vergrößerungsbereich (bis zirka 400.000-fach) bei gleichzeitig deutlich besserer Tiefenschärfe aus.

Als Nachteil der Rasterelektronenmikroskopie sind zum einen der relativ hohe apparative Aufwand, zum anderen sicherlich auch die Limitierung auf feste, trockene Proben zu erwähnen; auch für die REM gilt – ähnlich wie bei den anderen mikroskopischen Methoden –, dass Proben praktisch nicht zerstörungsfrei untersucht werden können.

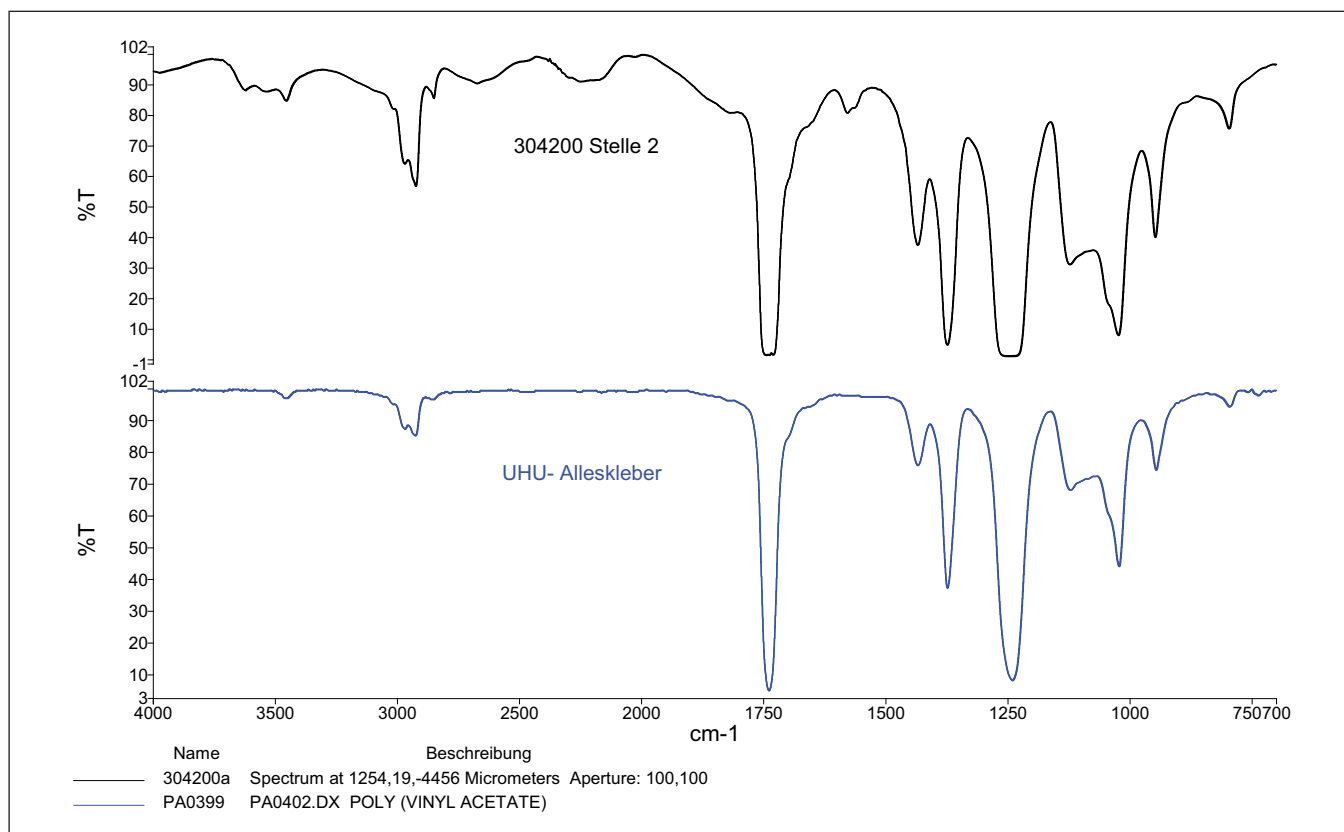


Abbildung 12: Infrarotspektrum von den „aufglänzenden Stellen“; Vergleichsspektrum von UHU-Alleskleber

Beispiel 2: Die klagende Partei klagt, dass der Lenker eines Motorrades einen Verkehrsunfall verschuldete bzw. verursachte, indem er zwischen den Fahrzeugen einer Kolonne durchfuhr und dabei die linke Seite des Klagsfahrzeugs mit dem Blinker streifte (siehe Abbildungen 6 bis 10).

Ergebnis: Die Bindemittelbasis des rötlich wirkenden Abriebs wurde infrarotspektroskopisch einem Polyurethan und/oder styrolisierten Acrylaten mit Isocyanaten vernetzt zugeordnet. Die Infrarotspektren vom Blinkercellon wurden hingegen einem Copolymer aus Polystyrol und Acrylnitril zugeordnet. Eine Übereinstimmung war demnach nicht gegeben.

Beispiel 3: In einem Versicherungsfall wurde angegeben, dass ein Schaden am Fahrzeug durch Kollision mit einem Hasen entstanden sei. Auffällig waren dabei vor allem „aufglänzende Stellen“ um die Haare auf der vorderen Kunststoffstoßstangenverkleidung.

Ergebnis: Die Haare stellten sich als Hundehaare heraus. Auf der Stoßstangenverkleidung fixiert wurden sie offensichtlich mit einem Klebstoff (wie zB mit UHU-Alleskleber).

5. Zusammenfassung

Die Möglichkeiten für den Gutachter, Schäden bei Kfz-Lackierungen aufzuklären, sind vielfältig. Je nach Fragestellung ist durch entsprechende Wahl der Methoden in vielen Fällen eine rasche, effiziente und eindeutige Feststellung der Schadensursache möglich, wobei – nicht zuletzt zur eigenen Absicherung – möglichst eine Kombination unterschiedlicher Methoden zur Anwendung kommen soll.

Korrespondenz:
 Mag. Dr. Anton Grünberger
 E-Mail: anton.gruenberger@ofi.at